

# 慣性センサを利用したリンゴ栽培作業の動作計測

## Motion measurement of apple cultivation work using inertial sensor

○佐藤直樹\*, 佐川貢一\*, 長井力\*

○Naoki Sato\*, Koichi Sagawa\*, Chikara Nagai\*

\*弘前大学

\*Hirosaki University

**キーワード** : 慣性センサ (Inertial Sensor), 動作計測 (Motion Measurement), 姿勢推定 (Posture Estimation), 屈曲角度 (Bending Angle), リンゴ栽培 (Apple Cultivation)

**連絡先** : 〒 036-8561 青森県弘前市文京町 3 番地  
弘前大学 大学院 理工学研究科 機械科学コース 佐川研究室  
佐藤直樹, Tel.: (080)1699-1487, E-mail: h20ms510@hirosaki-u.ac.jp

## 1. 緒言

### 1.1 研究背景

近年, リンゴ栽培を始めとする果樹生産の現場では, 人手不足を背景とした農作業従事者の高齢化が深刻な課題となっている<sup>1)</sup>。しかし, リンゴ栽培の現場において, 機械化が進んでおらず, 未だ多くの工程が手作業で行われている。また, リンゴ栽培作業では, 長時間の肉体労働を強いられ, 高齢の農作業従事者にとって身体的負担の大きい作業であると考えられる。その解決策として, 産業用ロボットによる作業の自動化が挙げられるが, カメラ画像による対象物の認識やそれにかかる処理時間が懸念されることや, 幼果や果実を傷つけないような繊細な制御が求められるため, 実用化は難しいと言える。また, 個人経営農家が多い日本では, 導入コストが高いことが挙げられる<sup>1)</sup>。そのため, 農作業時の身体的負担を軽減するためには, 農作業

用アシストスーツによる身体動作の補助が望ましいと考えた。先行研究として, 大西ら<sup>3)</sup>は, リンゴ収穫作業のための上肢を補助するパワーアシストスーツを開発し, 身体負荷軽減効果について評価している。しかし, 対象作業はリンゴ収穫作業に限定され, 収穫作業以外の作業項目について考慮されていない。リンゴ栽培作業には, 「収穫」のみならず, 「摘果」, 「袋掛け」, 「葉とり」作業などが1年を通して行われており, 作業内容が異なっている<sup>2)</sup>。そのため, 利便性が高く, 実用的な農作業用アシストスーツを開発するためには, 種々の栽培作業に対応させる機構設計が必要である。本研究では, 以上に記述した4項目のリンゴ栽培作業に着目し, 慣性センサシステムを用いた身体の動作計測を目的とする。そして, 各作業の身体的負担や違いを明らかにするため, 腕の上げ下ろしと関連する肩や肘および体幹の屈曲角度を導出し, 傾向を比較した。

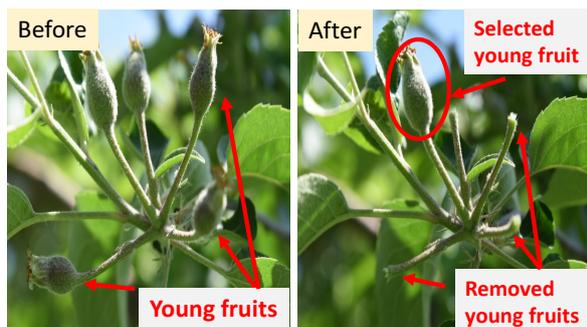


Fig. 1 Work contents of young fruit picking

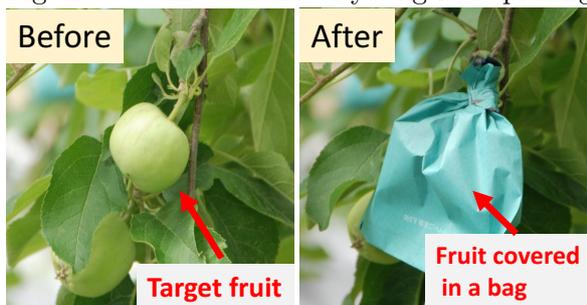


Fig. 2 Work contents of bag hanging

## 1.2 各リンゴ栽培作業の作業内容について

本研究にて、計測する作業内容を以下に示す。

- 摘果  
果実を大きく育てるために、不要なリンゴの幼果を取り除く作業。Fig.1 に着手前後の比較画像を示す。5-6月に行われる。
- 袋掛け  
病虫害予防や着色管理を目的とした、リンゴの実に袋を被せる作業。Fig.2 に着手前後の比較画像を示す。6-7月に行われる。
- 葉とり  
リンゴの実に日光が当たるように葉を摘み取る作業。Fig.3 に着手前後の比較画像を示す。8-11月に行われる。
- 収穫  
成熟したリンゴをもぎ取る作業。また、Fig.4 に示すようなリンゴ籠の運搬動作も加わる。9-11月に行われる。

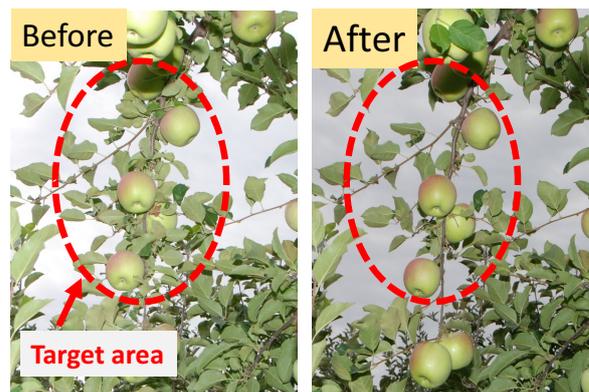


Fig. 3 Work contents of leaf picking



Fig. 4 Transporting apple baskets during harvesting

## 2. 原理

### 2.1 センサによる姿勢表現

慣性センサの感度軸方向は、直交する3つの単位ベクトル  $i, j, k$  軸で表される。ここで、地球上を基準としたワールド座標系を  $\Sigma_0$ 、個々の慣性センサが持つ独自の座標系を移動座標系  $\Sigma_r$  と定義する。また、ワールド座標系  $\Sigma_0$  は、北方向を  $X$  軸、西方向を  $Y$  軸、 $X$  軸と  $Y$  軸の外積方向を  $Z$  軸とする。これらの関係を Fig.5 に示す。このとき、慣性センサの姿勢  ${}^0E_r$  は、ワールド座標系における単位ベクトル  ${}^0i, {}^0j, {}^0k$  の  $X, Y, Z$  軸方向成分を用いて、以下のように表せる。

$${}^0E_r = \begin{bmatrix} {}^0i & {}^0j & {}^0k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x & j_x & k_x \\ i_y & j_y & k_y \\ i_z & j_z & k_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

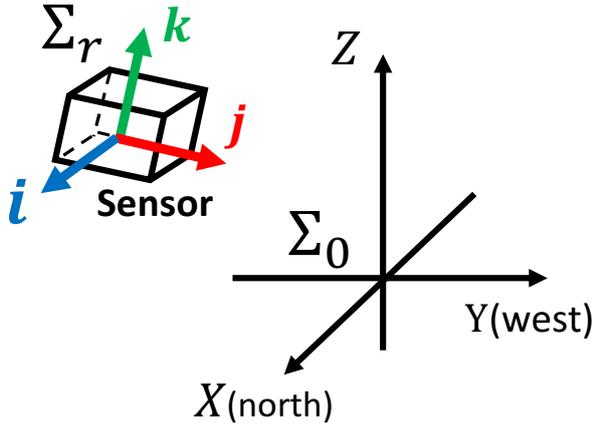


Fig. 5 Definition of world coordinate system and sensor coordinate system

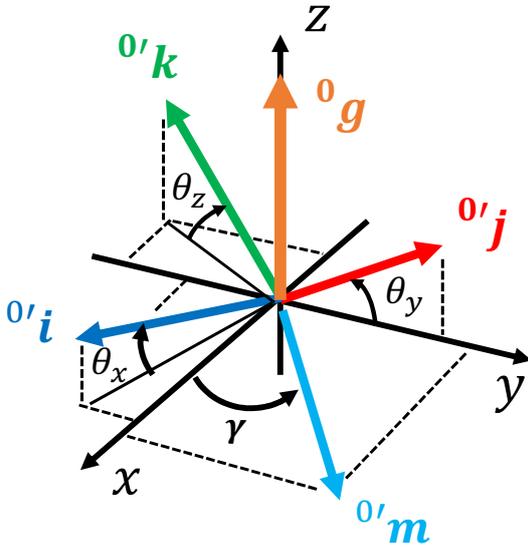


Fig. 6 Initial posture of sensor without considering geomagnetism

ここで、 ${}^0E_r$ における左上の添え字は、行列やベクトルが観測された座標系を表し、右下の下付き文字は、行列やベクトル自体の座標系を表す。まずは、加速度 $\mathbf{a}$ や地磁気 $\mathbf{m}$ の出力値を用いて、初期姿勢 ${}^0E_r(1)$ を計算する<sup>4)</sup>。3軸の加速度センサの出力値を $a_x, a_y, a_z$ と定義すると、重力加速度 $\|{}^0g\|$ は、

$$\|{}^0g\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (2)$$

となる。水平面と感度軸ベクトル ${}^0i, {}^0j, {}^0k$ とのなす角を $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ とする。このとき、

$$\theta_x = \sin^{-1} \frac{a_x}{\|{}^0g\|} \quad (3)$$

$$\theta_y = \sin^{-1} \frac{a_y}{\|{}^0g\|} \quad (4)$$

$$\theta_z = \sin^{-1} \frac{a_z}{\|{}^0g\|} \quad (5)$$

となる。いま、Fig.6に示す ${}^0j$ が地磁気を考慮しない固定座標系 $\Sigma'_0$ 座標系の $y-z$ 平面上にあると仮定すると、初期姿勢 ${}^0E_r(1)$ は、以下のように求まる。

$${}^0E_r(1) =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\sin \theta_z}{\cos \theta_y} & 0 & -\frac{\sin \theta_x}{\cos \theta_y} \\ -\tan \theta_y \sin \theta_x & \cos \theta_y & -\tan \theta_y \sin \theta_z \\ \sin \theta_x & \sin \theta_y & \sin \theta_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

次に、座標系 $\Sigma'_0$ におけるセンサ姿勢 ${}^0E_r$ を $X$ 軸を北向きとしたワールド座標系 $\Sigma_0$ におけるセンサ姿勢 ${}^0E_r$ に変換する。そのため、センサ座標系 $\Sigma_1$ で観測された地磁気 ${}^1m$ を座標系 $\Sigma'_0$ から観測された値に変換する。

$${}^0m = {}^0E_1 {}^1m \quad (7)$$

式(7)より推定した ${}^0m$ が、ワールド座標系 $\Sigma_0$ の北方向に相当する $X$ 軸とのなす角 $\gamma$ を計算する。

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{{}^0m_y}{{}^0m_x} \quad (8)$$

座標系 $\Sigma'_0$ は座標系 $\Sigma_0$ を鉛直軸回りに $\gamma$ だけ回転させた座標系である。つまり、 ${}^0E_r$ を $z$ 軸回りに $-\gamma$ だけ回転させることで、ワールド座標系 $\Sigma_0$ におけるセンサ姿勢 ${}^0E_r$ に変換できる。

$${}^0E_r(1) = \begin{bmatrix} \cos(-\gamma) & -\sin(-\gamma) & 0 \\ \sin(-\gamma) & \cos(-\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^0E_r \quad (9)$$

次に、角速度の積分により、センサ姿勢を更新する。本研究では、センサの姿勢 ${}^0E_r$ をクォータニオン $\mathbf{q}$ に変換し、回転クォータニオン $U$ によって、姿勢更新を行う<sup>5)</sup>。

## 2.2 角速度の積分誤差の軽減方法

角速度による姿勢更新は、積分誤差の蓄積によって推定精度が下がることが懸念される。そ

ここで、本研究では、アンセンテッドカルマンフィルタ (UKF)<sup>6)</sup> を設計し、静止時には観測値となる加速度や地磁気によって姿勢を推定し、動作時には角速度で姿勢を推定するように制御した。UKF は、アンセンテッド変換を用いて  $n$  次元確率変数の統計量を近似計算する手法である。UKF の状態方程式を式 (10) に示し、観測方程式を式 (11) に示す。

$${}^0\mathbf{q}_r(t+1) = {}^0\mathbf{q}_r(t)^rU(t) + \mathbf{w}_q(t) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(t) &= \begin{pmatrix} {}^1\mathbf{a}(t) \\ {}^1\mathbf{m}(t) \end{pmatrix} + \mathbf{v}(t) \\ &= \begin{pmatrix} {}^1E_0(t) {}^0\mathbf{a}(1) \\ {}^1E_0(t) {}^0\mathbf{m}(1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{v}_a(t) \\ \mathbf{v}_m(t) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

と表せる。このとき、 $\mathbf{w}_q$  はプロセスノイズ、 $\mathbf{v}$  は観測ノイズを表す。これらのノイズは、全て白色雑音を仮定している。

### 2.3 各部位の姿勢の決定方法

本研究では、加速度センサから取得された初期の重力加速度ベクトルに更新された姿勢  ${}^0E_r$  を乗じることで、各セグメントの長軸方向の姿勢ベクトルを計算する。なお、姿勢  ${}^0E_r$  は、2.2 にて更新されたクォータニオン  $\mathbf{q}$  を変換することで導出できる<sup>5)</sup>。各センサの姿勢を  ${}^0E_r(t)$ 、 $i, j, k$  軸ベクトルを  $\mathbf{i}_r, \mathbf{j}_r, \mathbf{k}_r$ 、センサ座標系  $\Sigma_1$  から観測された重力方向の単位ベクトルを  ${}^r\mathbf{a}(1)$  と定義すると、単位姿勢ベクトル  ${}^0\mathbf{V}_r(t)$  は、

$${}^0\mathbf{V}_r(t) = {}^0E_r(t) {}^r\mathbf{a}(1) \quad (12)$$

と表せる。なお、 $r$  はセンサ番号を表し、 $r = 1, 2, \dots, 13$  である。各センサから推定した姿勢ベクトル  ${}^0\mathbf{V}_r$  に被検者のリンクの長さを乗じてベクトル同士を連結させることで、身体の関節座標を導出する。Fig.7 に各部位の姿勢ベクトルと関節座標を示す。なお、体幹の中心座標  $O$  を原点とし、肩部および腰部の長軸ベクトルは、胸部および腰部に装着したセンサの姿勢の  $\mathbf{j}$  軸成分を使用した。

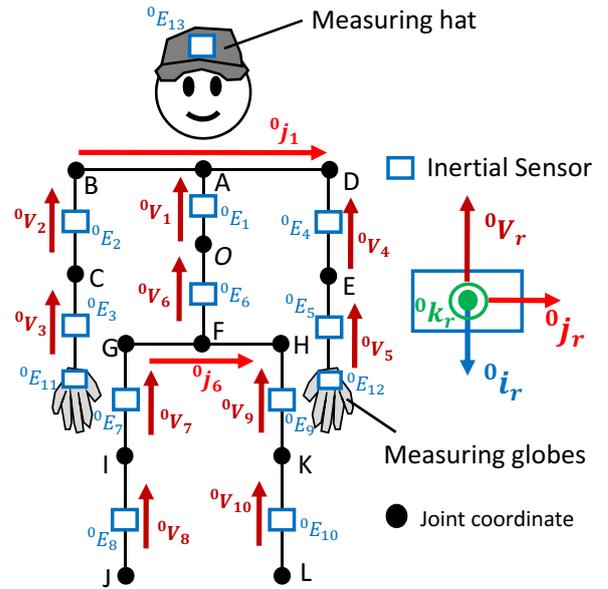


Fig. 7 Position of attached sensors and definition of posture vector and matrix

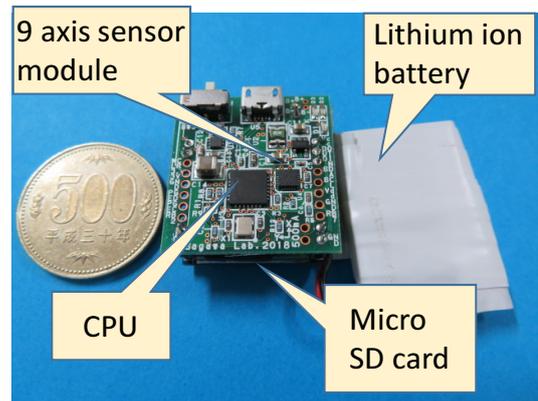


Fig. 8 Overview of Inertial sensor

## 3. 実験

### 3.1 実験装置

本研究にて使用する慣性センサの外観を Fig.8 に示す。本システムは、加速度、角速度、地磁気を計測する 9 軸のセンサモジュール (MPU-9250, InvenSense Inc, 計測範囲:  $\pm 156.8 \text{m/s}^2$ ,  $\pm 2000 \text{deg/s}$ ,  $\pm 1200 \mu\text{T}$ ), リチウムイオン電池, 無線通信モジュール (XBee, Maxstream Inc, 転送速度 115200bps), MicroSD カードから構成される。XBee による計測開始信号を受信すると、サンプリング周波数 100Hz で加速度、角速度、地磁気を計測し、microSD カードに記録される。

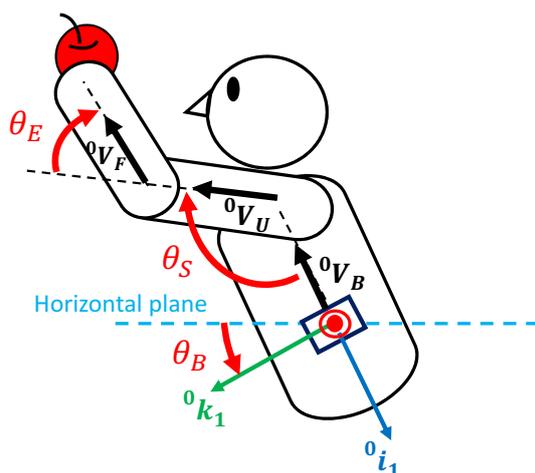


Fig. 9 Definition of bending angle Part 1

### 3.2 実験方法

実験は、医師からの運動制限がなく、作業経験のある健常若年者(年齢22歳、身長175cm、体重58kg、男性1名)を対象に、青森県弘前市のりんご農園にて計測を行った。各計測実験は、摘果作業を2020年5月、袋掛け作業を同年7月、葉取りおよび袋はぎ作業を同年9月、つる回し作業を同年10月、収穫作業を同年11月に実施した。被検者の胴部および下肢には、体に密着しやすいコンプレッションウェアを着用し、左右の前腕および上腕部には、腕部専用の装具を装着させた。左右の手部には、甲部にセンサ収納部を設けた手袋を用意し、頭部も同様にセンサ収納部を備えた帽子を着用させた。そこに、慣性センサをFig.7に示す全13箇所(頭部、胸部、腰部、左右の上腕、前腕、手首、大腿、下腿)の部位にマジックテープで固定した。計測開始時は、初期姿勢を決定するため、被検者は両腕をまっすぐ下ろした直立状態で静止させる。その後、普段通りの農作業を1時間程度行わせた。また、実験中の姿勢推定精度を確認するため、被検者の動きをビデオカメラで常時撮影した。

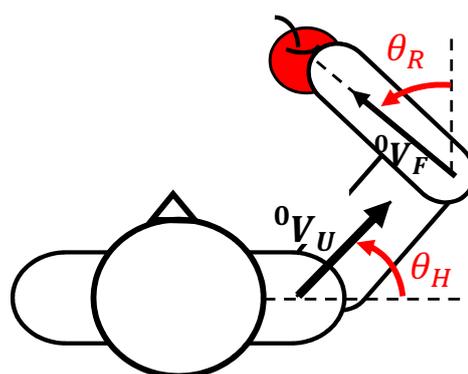


Fig. 10 Definition of bending angle Part 2

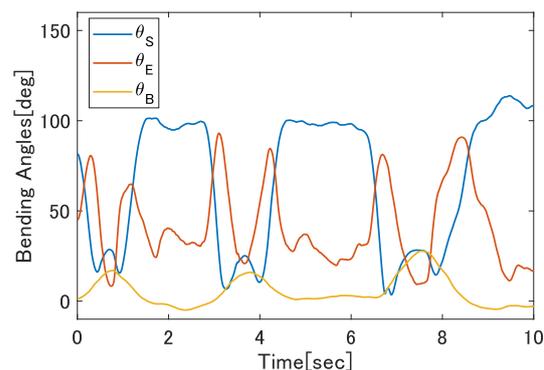


Fig. 11 An example of bending angles during harvesting

### 3.3 屈曲角度、屈曲角速度および屈曲角加速度の導出方法

本研究では、農作業にて特に使用頻度の多かった上肢の動きに着目し、以下に示す屈曲角度を推定した。

- 肩関節屈曲角度  $\theta_S$
- 肩関節水平屈曲伸展角度  $\theta_H$
- 肩関節内旋外旋角度  $\theta_R$
- 肘関節屈曲角度  $\theta_E$
- 体幹屈曲角度  $\theta_B$

導出する関節角度をFig.9およびFig.10に示す。上腕、前腕、体幹の姿勢ベクトル  ${}^0V_U$ ,  ${}^0V_F$ ,  ${}^0V_B$  および姿勢  ${}^0E_r$  の  $i, j, k$  成分を用いて、各屈曲角度を推定した。なお、屈曲角速度および屈曲角加速度は、屈曲角度を微分することによ

て導出される。一例として、Fig.11 に収穫作業におけるりんごをもぐ動作をしている時の角度波形を示す。グラフより、収穫作業には肩および肘の屈曲運動が関連していると読み取れる。

### 3.4 解析項目

本研究では、20分間の作業中の計測データを無作為に抽出し、屈曲角度の頻度、1分間あたりの平均屈曲回数、屈曲角速度、屈曲角加速度の最大値および最小値を推定した。なお、腕の関節角度は、被検者の利き腕となる右腕の運動を対象とした。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 肩、肘、体幹の屈曲頻度

Fig.12 は、肩の屈曲角度の度数分布を示している。全体的に  $20^{\circ}$  から  $100^{\circ}$  にかけて一様に推移していることから、腕を様々な高さに移動させて作業していることがわかる。Fig.13 は、肩の水平屈曲伸展角度の度数分布を示す。摘果、袋掛け、葉とり作業では、 $+80^{\circ}$  から  $+120^{\circ}$  にかけてピークが存在するため、作業中に腕を前方向に出して作業していることが伺える。Fig.12,13 より、収穫作業は他の作業と傾向が異なっており、両グラフとも低い角度区間に頻度が集中していることが確認された。このことから、作業中は腕を上げていない、もしくは腕を上げる時間が短いことが推測される。Fig.14 に肩の内旋外旋角度の屈曲頻度を示す。グラフより、作業中の運動は、外旋運動よりも内旋運動の方が共通して多いことが分かる。Fig.15 に肘の屈曲頻度を示す。 $60^{\circ}$  以上の相対度数が高いことから、りんご栽培作業中は、肘を伸ばす動作よりも肘を曲げる姿勢をとることが多いことが分かる。特に、袋掛け作業における相対度数は  $60-80^{\circ}$  区間において相対度数 0.5 以上を示していた。Fig.16 では、体幹の屈曲頻度を示す。袋掛けおよび葉と

り作業では、 $0-20^{\circ}$  の頻度が極めて高いため、作業中は直立姿勢を取ることが多いと推測される。

### 4.2 単位分あたりの平均屈曲回数

Fig.17,18 より、収穫作業の屈曲回数が他の作業と比べて相対的に多いことが分かる。そのことから、りんごをもぎ取る動作が肩や肘の屈曲および内旋運動に関連していると考えられる。また、Fig.18 では、肩の内旋および外旋回数を示しており、全ての作業において外旋運動よりも内旋運動が多いことが示唆される。Fig.19 に示す体幹の屈曲回数では、収穫動作が最も多い結果となった。その背景として、Fig.4 のようなりんごの籠を移動させる際に腰を下ろす動作が体幹の屈曲回数に直結していると考えられる。

### 4.3 屈曲角速度および角加速度の出力範囲

Fig.20 に肩、肘および体幹の屈曲角速度の出力範囲を示す。角速度の大きさは、肩の運動が  $\pm 400\text{deg/s}$  前後、肘の運動が  $\pm 500\text{deg/s}$  前後、体幹の運動が  $\pm 200\text{deg/s}$  前後である。角速度の分布を調査したところ、角速度が  $\pm 20\text{deg/s}$  の低い区間に頻度が集中していた。そのことから、りんご栽培作業にはスポーツ動作のような素早い動作を必要とせず、終始ゆっくりとした速度で作業していることがわかる。しかしながら、Fig.21 にて推定された角加速度の出力範囲を参照すると、各関節間に瞬間的に角加速度が生じていることが確認された。よって、りんご栽培用アシストスーツの開発には、作業中のヒトの動きを追従できるような機能性が必要があると考える。

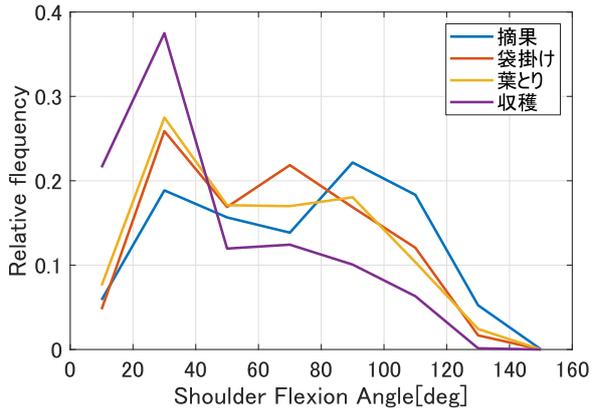


Fig. 12 Histogram of Shoulder Flexion Angle  $\theta_S$  during work

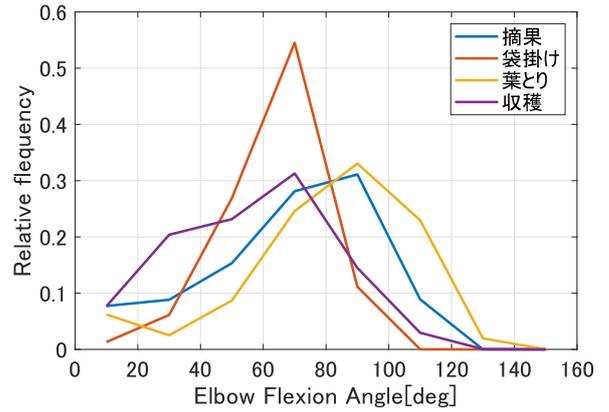


Fig. 15 Histogram of Elbow Flexion Angle  $\theta_E$  during work

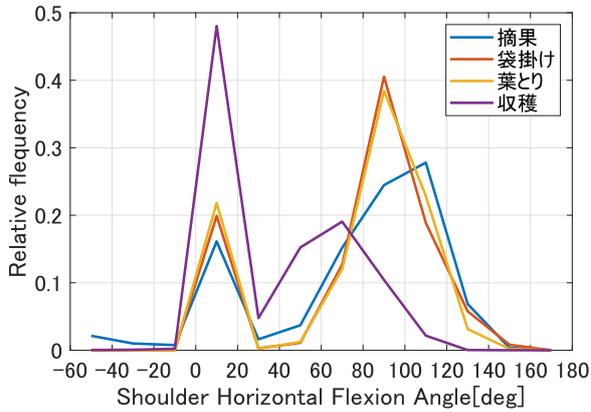


Fig. 13 Histogram of Shoulder Joint Horizontal Flexion Angle  $\theta_H$  during work

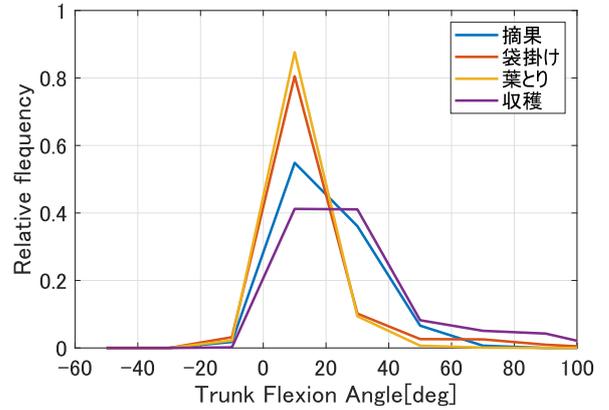


Fig. 16 Histogram of Trunk Flexion Angle  $\theta_B$  during work

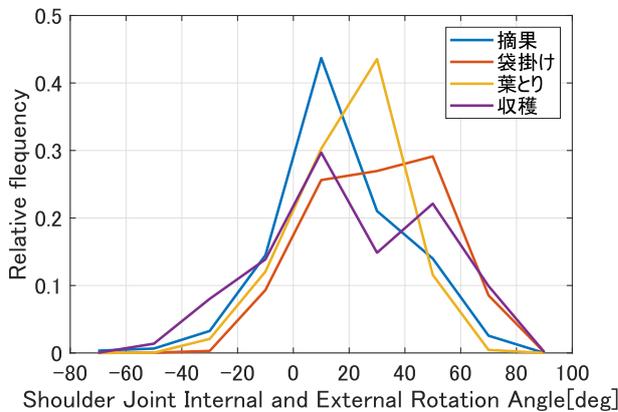


Fig. 14 Histogram of Internal and External Rotation Angles  $\theta_R$  of the Shoulder during work

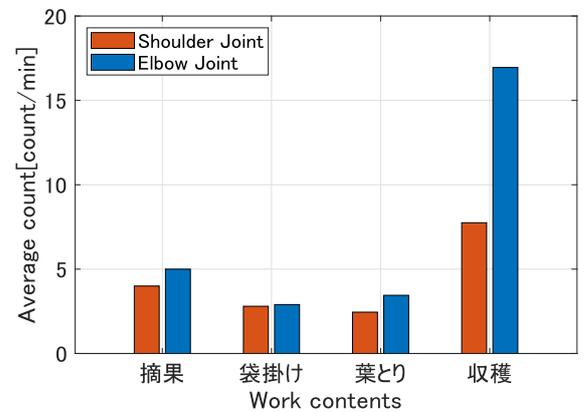


Fig. 17 Average number of Upper limb flexions per minute

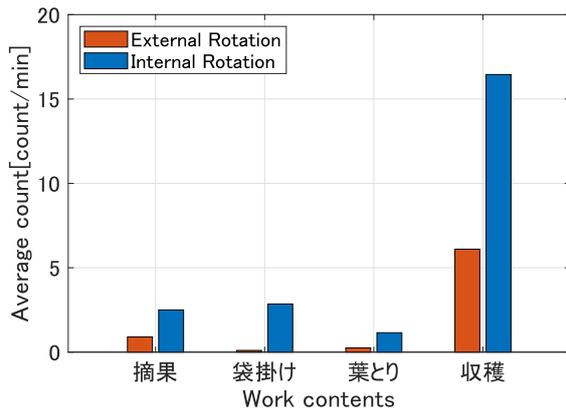


Fig. 18 Number of Internal and External Rotations of the Shoulder per minute

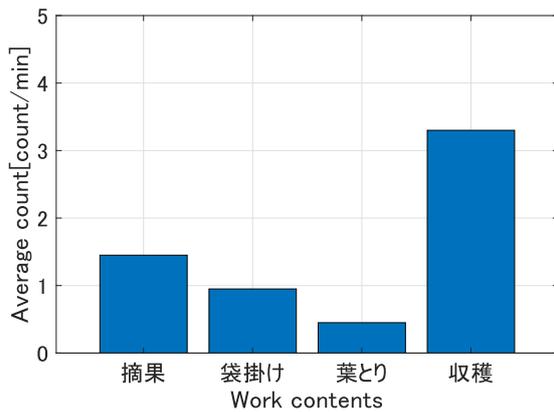


Fig. 19 Number of Trunk Flexion per minute

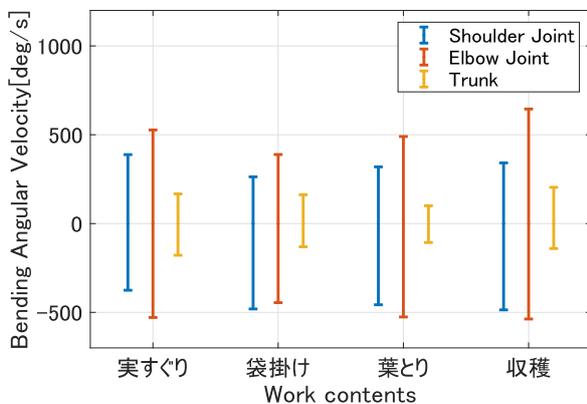


Fig. 20 Range of Flexion Angular Velocity

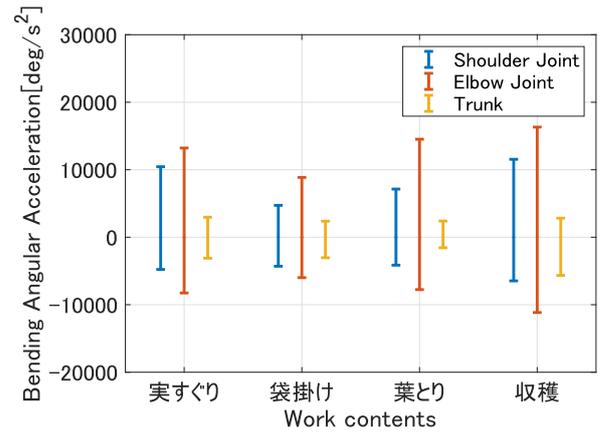


Fig. 21 Range of Flexion Angular Acceleration

## 5. 結論

本研究では、屈曲角度の推定結果より、収穫作業が他の動作と大きく傾向が異なっていたことを見出した。屈曲頻度の推定結果より、摘果、袋掛け、葉とり作業には、腕を上げたままの姿勢を維持した状態で作業していることが判明した。そのため、このような拳上姿勢の維持は、農作業従事者にとって上肢に負担の大きい姿勢であると考えられる。一方で、収穫作業には、りんごをもぎ取るために上肢を屈曲する回数が多いことが判明した。そのため、汎用的なりんご栽培作業用アシストスーツ設計における要求事項は、上肢を上げた状態の姿勢の補助だけではなく、腕の上げ下ろしに対応した柔軟な機構であることが望ましいと考える。また、体幹の屈曲頻度が他の作業よりも多いことから、収穫作業は、前傾姿勢時における腰部の身体的負担が伴うことが懸念されるため、当該箇所の保持も必要であると考えられる。屈曲角速度は、肘の屈曲角速度が大きい傾向であり、作業ごとの差異は見られなかったが、瞬間的に大きな加速度が作用することが判明した。そのことから、アシストスーツの装着を想定した場合、作業の妨げとならないような構造および自由度が求められると推察する。以上の結果より、汎用的なアシストスーツを設計する際には、ヒトの動作速度を

追従するような機能性やサポート部位を作業毎に適応して補助する設計が必要であると考える。

## 6. 結言

本研究では、慣性センサを用いてリンゴの各農作業動作の計測を行い、肩や肘および体幹の屈曲角度を導出した。無作為に抽出した角度データより、屈曲頻度や屈曲回数を推定し、作業の傾向を比較した。その結果、摘果、袋掛け、葉とり作業には、上肢の姿勢を維持する傾向が高いことが判明した。また、収穫作業は、肩や肘の屈曲回数が多く、作業中の前屈姿勢が腰部に負担がかかっていることを定量的に評価した。今後は、アシストスーツの機構設計に向けて、左右の上肢動作および下肢動作、高所作業に着目した動作計測等を幅広く行い、動作の傾向を定量的に評価していく予定である。

## 参考文献

- 1) 農林水産省, 平成 31 年度農業構造実態調査
- 2) 臼谷三郎: リンゴ栽培の労働科学, 日農医誌, Vol.37, No.6, pp.1031-1048, 1989
- 3) 大西章寛, 長井力, 佐川貢一: リンゴ栽培作業支援のための上肢パワーアシストスーツの開発, 計測自動制御学会東北支部第 330 回研究集会, 330-6
- 4) 佐川貢一, 煤孫光俊, 大瀧保明, 猪岡光, “足爪先加速度積分による歩行経路の 3 次元無拘束計測”, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.6, pp.635-641, 2004
- 5) 矢田部学, クォータニオン計算便利ノート, MSS 技報, Vol.18, pp.29-34, 2007
- 6) 足立修一・丸田一郎: カルマンフィルタの基礎, 東京電機大学出版局, 2012 年